

УДК 691.535

DOI 10.23968/1999-5571-2025-22-5-52-58

© В. С. Ковальчук, соискатель
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

© V. S. Kovalchuk, competitor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦЕМЕНТНЫХ СОСТАВОВ С РАЗЛИЧНЫМ ВОДОСОДЕРЖАНИЕМ

RHEOLOGICAL MODEL FOR CEMENT MIXTURES WITH VARYING WATER CONTENT

Реологические модели играют решающую роль в прогнозировании поведения вяжущих материалов. Анализ научных источников показал отсутствие единой теории изменения вязкости и текучести цементного теста. В работе приведен экспериментальный анализ реологических параметров шести составов тампонажных смесей. Результаты математического моделирования подтвердили значительное влияние водоцементного отношения на реологию суспензии. В статье дано представление о возможности исследования вязкости и текучести цементного теста с повышенным водосодержанием, что может быть использовано для прогнозирования поведения тампонажной смеси в реальных условиях.

Ключевые слова: тампонажный портландцемент, реология, вязкость, математическое моделирование.

Rheological models play a crucial role in predicting the behavior of binders. A review of special literature has revealed a lack of a unified theory of changes in the viscosity and fluidity of cement paste. This paper presents results of the experimental analysis of the rheological parameters of six grouting mixtures. The results of mathematical modeling confirm a significant influence of the water-cement ratio on the rheology of the suspension. The findings provide insight into the potential for studying the flow properties of high-water-content cement pastes and can aid in predicting the performance of grouting mixtures under real conditions.

Keywords: grouting Portland cement, rheology, viscosity, mathematical modeling.

Введение

Реологические свойства цементного теста определяют не только его способность к деформации, но и важные технологические параметры конструкции в процессе гидратации цемента, которые сложно измерить в определенный период времени. Тампонажные смеси используются для цементирования колонн обсадных труб и ликвидации скважин в гидротехническом и подземном строительстве, стабилизации грунтов в дорожном и городском строительстве, а также для различных специальных геоинженерных работ [1].

Водоцементное отношение (В/Ц) регулирует свойства цементного теста и камня. При значениях В/Ц менее 0,5 частицы цемента образуют сеть прочно связанных гидратов, что указывает на неньютоновское поведение тампонажного теста. При повышении расхода воды происходит увеличение толщины водной пленки, а также расстояния между частицами цемента, а значит, повышение текучести и снижение вязкости цементной смеси [2]. На сегодняшний день существует множество реологических кривых для определения кажущейся вязкости и напряжения сдвига. Применяемые модели Бингама,

Хершеля–Балкли и другие модифицированные модели [3–5] подходят для практической реализации, поскольку они отражают основные реологические параметры, наблюдаемые в цементных материалах. Существуют модели с учетом влияния состава и свойств клинкера, В/Ц, температуры, методики приготовления цементного теста, а также использования добавок в цементные и бетонные смеси [6–8]. Кроме всестороннего обзора существующих реологических моделей, авторы [9] предложили обобщенную структурную модель, включающую влияние переменной вязкости при сдвиге, концентрацию, тиксотропию и др. Статья [10] отражает прогнозную нелинейную модель реологических свойств и прочности при сжатии цементных составов с добавкой наноглины. Температурная модель прогнозирования вязкости цементных составов с учетом влияния колебаний вязкости воды наглядно показала, что разные температура и водоцементное отношение активно влияют на все реологические характеристики цементных смесей [11]. В исследовании [12] оценено влияние повышенных температур горных пород на свойства тампонажного цемента. Результаты экспериментов указали на значительное ухудшение реологических характеристик цементных смесей, особенно при В/Ц более 0,6, а также отсутствие единой математической модели для прогнозирования поведения цементной смеси при заданных условиях. На основе теоретических исследований и экспериментальных тестов авторы [13] разработали экспоненциальную реологическую модель с учетом консистенции смеси. Однако ни одна из существующих моделей не может быть обобщена и использована для расчета высокотекучего строительного раствора из-за больших отклонений моделируемых реологических параметров. В исследовании [2] изучались внешние (температура и время) и внутренние (характеристики материалов, В/Ц и содержание добавок) факто-

ры, описанные в известных математических моделях. Авторами было определено, что влияние температуры прямо зависит от исходной вязкости материала, а время сдвига, как и другие реологические характеристики, в основном зависит от структурных изменений в процессе гидратации цемента. Поведение цементных составов с В/Ц от 0,75 до 1,25 с течением времени было изучено в статье [14]. В исследовании [15] указано, что пластическая вязкость является более надежным параметром для исследования реологии суспензий с высоким значением В/Ц по сравнению с пределом текучести. Численное моделирование, машинное обучение и точные алгоритмы позволяют прогнозировать реологию суспензий, а именно предел текучести и пластическую вязкость цементных и бетонных составов, с наименьшей потенциальной ошибкой [16, 17]. В работе [18] математический расчет реологических параметров соответствует только одной серии испытаний с установленными характеристиками цементного состава. Таким образом, несмотря на активное развитие аналитических методов, при каждом изменении исходных показателей требуется использовать различные реологические модели ввиду высоких отклонений параметров вязкости.

Реологические свойства тампонажных цементов являются основными показателями возможности использования материала для успешного строительства. Целью данной статьи являются анализ и разработка усовершенствованной модели оценки и прогнозирования вязкости и напряжения сдвига составов тампонажных смесей для цементирования скважин с учетом влияния разного водоцементного отношения.

Методы

В исследовании использовался выпускаемый по ГОСТ 1581–2019 портландцемент тампонажный ПЦТ-I-50 — общедоступный строительный материал для цементирования скважин различного назначения. Минераль-

ный состав ПЦТ-I-50 включает C_3S — 65,8 %; C_2S — 10,4 %; C_3A — 5,8 % и C_4AF — 12,9 %. Основными химическими фазами цемента являются 64,9 % CaO и 20,5 % SiO_2 , а также Al_2O_3 , Fe_2O_3 и SO_3 в объеме 3–4 %.

Для удовлетворения требований по прокачиваемости и растекаемости стандартных тампонажных смесей принято использовать $V/C = 0,44...0,50$, но для облегченных и утяжеленных цементов этот показатель можно варьировать в диапазоне от 0,30 до 1,30. Для понимания влияния реологических параметров различных тампонажных смесей были выбраны шесть составов с V/C от 0,5 до 1,0. Лабораторные исследования проводились на реометре Anton Paar MCR102.

Для расчета тампонажных смесей с разным V/C была выбрана широко используемая реологическая модель Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{пл} \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где τ — напряжение сдвига, Па; τ_0 — предел текучести, Па; $\eta_{пл}$ — пластическая вязкость, Па · с; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, c^{-1} .

Для моделирования цементных суспензий с разным исходным V/C на основании исследований [9, 19–21] были предложены следующие формулы с использованием коэффициентов K , n , SSB и эталонной скорости сдвига $\dot{\gamma}_0$:

$$\tau = K \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^n = (-175 w/c + 137) \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right)^{0,6}; \quad (2)$$

$$\tau_y = K (w/c) (SSB - 2000). \quad (3)$$

Поскольку для исследования реологии цементных материалов необходимо учитывать влияние состава композиции, авторами [22] предложена шестипараметрическая модель (константы a , b , c , d , r и s) на основании теоретических и экспериментальных данных [23]:

$$\tau = (aw/c + b) \left\{ \dot{\gamma} + (cw/c + d) \right\} \left(\frac{r}{w/c + se^{-w/c}} \right). \quad (4)$$

Помимо определения напряжения сдвига и предела текучести, необходимо подобрать также математическую модель кажущейся

вязкости цементного теста с различным соотношением воды и цемента. В исследовании [24] с помощью теоретических закономерностей [20] и экспериментальных данных была разработана модель вязкости цементной смеси с учетом улучшающих добавок с использованием коэффициентов D_1 , D_2 , D_3 , C_1 в следующем виде:

$$\eta = \left[D_1 w/c^{D_2} + D_3 \right] \dot{\gamma}^{C_1 w/c - 1}. \quad (5)$$

После анализа данных методами математической статистики были получены значения эмпирических коэффициентов для реологической модели составов тампонажных смесей.

Результаты

Для построения моделей необходимо знать зависимости кажущейся вязкости η_a и напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$, которые были получены экспериментально для суспензий с $V/C = 0,5...1,0$ (табл. 1).

Из результатов измерений можно сделать вывод о сильном снижении вязких свойств цементного теста с ростом водосодержания, причем особенно резкое снижение наблюдается для составов с V/C от 0,5 до 0,7.

Обсуждение

При подстановке экспериментальных данных в формулу (4) с помощью математического анализа были получены коэффициенты модели расчета напряжения сдвига

Таблица 1

Определение кажущейся вязкости и напряжения сдвига

V/C	Зависимость кажущейся вязкости от скорости сдвига	Зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига
0,5	$\eta_a = 165,51 \dot{\gamma}^{-0,96}$	$\tau = 103,88 + 3,39 \dot{\gamma}$
0,6	$\eta_a = 39,91 \dot{\gamma}^{-0,99}$	$\tau = 34,75 + 0,58 \dot{\gamma}$
0,7	$\eta_a = 15,63 \dot{\gamma}^{-1,00}$	$\tau = 10,09 + 0,32 \dot{\gamma}$
0,8	$\eta_a = 7,50 \dot{\gamma}^{-0,99}$	$\tau = 4,85 + 0,16 \dot{\gamma}$
0,9	$\eta_a = 4,73 \dot{\gamma}^{-0,95}$	$\tau = 3,48 + 0,10 \dot{\gamma}$
1,0	$\eta_a = 4,19 \dot{\gamma}^{-0,98}$	$\tau = 2,73 + 0,09 \dot{\gamma}$

для цементных смесей на основе ПЦТ-I-50 с В/Ц = 0,5...1,0 (табл. 2).

Максимальная погрешность расчетов для разных В/Ц составила 6,7...12,8 %. Было определено, что представленные в виде функций зависимости коэффициентов от В/Ц интерполируются линейно, что говорит о достаточной надежности полученных данных и возможности использования модели для прогнозирования вязких свойств тампонажных составов. Недостатком данной математической модели является необходимость подбора коэффициентов под каждый состав индивидуально.

Для решения проблемы универсальности модели прогнозирования реологических параметров составов тампонажных смесей предложена модернизированная методика расчета кажущейся вязкости по формуле (5) с постоянными, объединенными в две группы согласно водосодержанию. Полученные в ходе математического анализ коэффициенты представлены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты расчета коэффициентов модели (4)

В/Ц	Эмпирические коэффициенты					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>r</i>	<i>s</i>
0,5	88,0	-20,0	-110	70	0,69	-1,35
0,6	70,0	-32,5	-88	67	0,71	-1,34
0,7	61,0	-37,9	-84	64	0,72	-1,27
0,8	54,0	-41,0	-69	60	0,74	-1,12
0,9	48,3	-42,0	-59	59	0,75	-1,05
1,0	45,4	-44,0	-54	58	0,76	-1,00

Таблица 3

Результаты расчета коэффициентов модели (5) для смесей на основе ПЦТ-I-50

Коэффициент	В/Ц	
	0,5...0,7	0,8...1,0
D_1	1,15	1,10
D_2	-7,00	-6,75
D_3	0,935	2,500
C_1	0,005	0,035

Таблица 4

Результаты расчета коэффициентов модели (6)

В/Ц	<i>a</i>	<i>b</i>
0,5	1,364	0,021
0,6	1,193	0,013
0,7	1,417	0,021
0,8	1,502	0,019
0,9	1,346	0,017
1,0	1,295	0,018

При решении обратной задачи были получены значения напряжения сдвига для составов с разными В/Ц. Полученные кривые наиболее достоверно отражаются следующей экспоненциальной зависимостью:

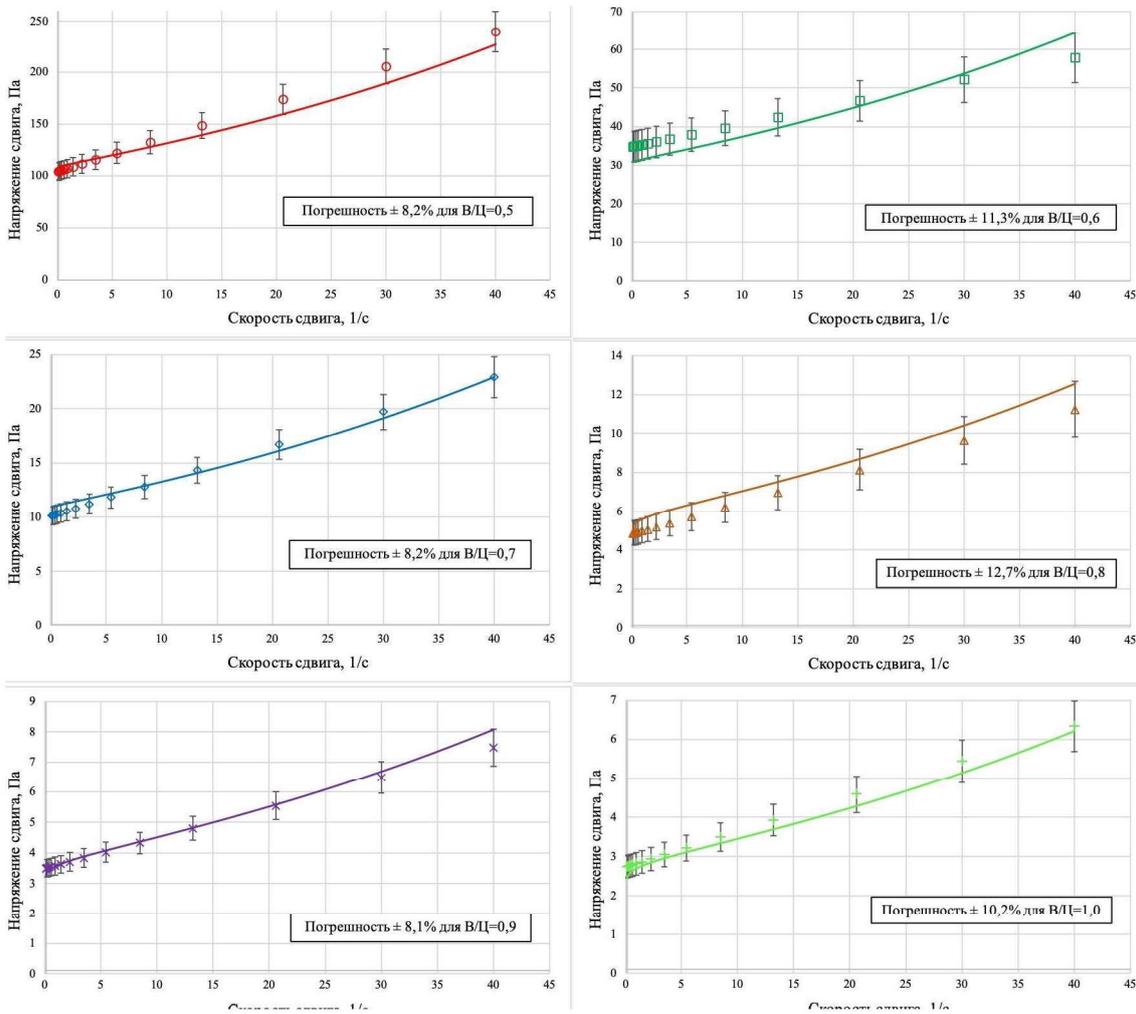
$$\tau = \frac{\eta\gamma}{ae^{-b\gamma}}. \quad (6)$$

Приведенная зависимость указывает на нелинейное изменение вязких свойств цементной смеси. Эмпирические коэффициенты модели для тампонажных составов на основе ПЦТ-I-50 представлены в табл. 4.

При сведении коэффициентов модели (6) к среднему значению были получены $a = 1,353$ и $b = 0,018$. Для изучения погрешностей обобщенной модели были построены прогнозные графики изменения напряжения сдвига с указанием максимальной ошибки измерений (см. рисунок).

Выводы

Несмотря на хорошо изученные реологические параметры цементного теста, на практике существует ряд сложностей оценки вязких свойств тампонажной смеси после закачки в скважину, особенно в начальный период расслоения смеси и седиментации частиц цемента. Благодаря комплексному подходу к исследованию были изучены наиболее важные реологические характеристики тампонажного цемента, такие как вязкость и напряжение при сдвиге. На основании тензорной теории напряжений вязких материалов и эмпирических результатов приведена обобщенная формула (6) расчета напряжения сдвига для составов тампонажных



Модель расчета напряжения сдвига цементных составов с В/Ц 0,5...1,0

смесей с водоцементным отношением от 0,5 до 1,0. Моделирование свойств строительных материалов позволяет управлять свойствами тампонажных составов, контролировать эффективность конструкции и планировать долгосрочное поведение цементного камня в реальных условиях эксплуатации. Данная работа может послужить основой для дальнейшего изучения реологических параметров цементных составов.

Библиографический список

1. Stryczek S., Kremieniewski M. Multi-Component Cements for Sealing Casing Columns in Boreholes // Buildings. 2023. Vol. 13 (7). 1633. DOI 10.3390/buildings13071633.

2. Sharma A., Gupta S., Husain M. N., Chaudhary S. Factors affecting the rheology of cement-based composites: A review // Journal of the American Ceramic Society. 2025. Vol. 108 (6). e20429. DOI 10.1111/jace.20429.

3. Saffari M., Ameri M., Jahangiri A., Kianoush P. Development of rheological models depending on the time, temperature, and pressure of wellbore cement compositions: a case study of southern Iran's exploratory oilfields // Arabian Journal of Geosciences. 2024. Vol. 17. 175. DOI 10.1007/s12517-024-11982-9.

4. Emad W., Mohammed A., Kurda R. Comparison Between Two Nonlinear Models to Predict the Stress-Strain Behavior, Modulus of Elasticity, and Toughness of the Flowable Cement Paste // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. Vol. 46. Pp. 2131–2145. DOI 10.1007/s40996-021-00700-0.

5. Thiedeitz M., Crasselt C., Xiao P., Ukrainczyk N., Schmidt W., Kränkel T. Multidisciplinary approach for the prediction of cement paste rheological properties: physical

analysis, experimental rheology and microstructural modelling // 21st Ibausil International Conference on Building Materials. 2023. Vol. 6 (6). Pp. 715–724. DOI 10.1002/cepa.2812.

6. Leite Skare E., Sheiati S., Cepuritis R., Mørtzell E., Smeplass S., Spangenberg J., Jacobsen S. Rheology Modelling of Cement Paste with Manufactured Sand and Silica Fume: Comparing Suspension Models with Artificial Neural Network Predictions // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 317. 126114. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.126114.

7. Ukrainczyk N., Thiedeitz M., Kränkel T., Koenders E., Gehlen C. Modeling SAOS Yield Stress of Cement Suspensions: Microstructure-Based Computational Approach // Materials. 2020. Vol. 13 (12). 2769. DOI 10.3390/ma13122769.

8. Pirharati M. E., Lowke D., Mai I. Modelling the effect of mortar constituents on rheological properties // 21st Ibausil International Conference on Building Materials. 2023. Vol. 6 (6). Pp. 638–647. DOI 10.1002/cepa.2919.

9. Tao C., Kutchko B. G., Rosenbaum E., Massoudi M. A Review of Rheological Modeling of Cement Slurry in Oil Well Applications // Energies. 2020. Vol. 13 (3). 570. DOI 10.3390/en13030570.

10. Mohammed A., Rafiq S., Mahmood W., Al-Darkazalir H., Noaman R., Qadir W., Ghafor K. Artificial Neural Network and NLR techniques to predict the rheological properties and compression strength of cement past modified with nanoclay // Ain Shams Engineering Journal. 2021. Vol. 12 (2). Pp. 1313–1328. DOI 10.1016/j.asej.2020.07.033.

11. Xu Z., Miao Y., Wu H., Yuan X., Liu C. Estimation of Viscosity and Yield Stress of Cement Grouts at True Ground Temperatures Based on the Flow Spread Test // Materials. 2020. Vol. 13 (13). 2939. DOI 10.3390/ma13132939.

12. Xu Z., Sun J., Li R., He L., Liu C. Effects of elevated ground temperatures on properties of cement grouts for deep rock grouting // Deep Underground Science and Engineering. 2025. Vol. 4 (2). Pp. 171–188. DOI 10.1002/dug2.12073.

13. Li M., Han J., Zhou Y., Yan P. A Rheological Model for Evaluating the Behavior of Shear Thickening of Highly Flowable Mortar // Molecules. 2021. Vol. 26 (4). 1011. DOI 10.3390/molecules26041011.

14. Yang Z., Chen M., Ding Y., Yang Y., Zhu Y., Guo Y., Wang R., Zhang B., Fang Y., Yu D., Mi Y., Su J., Hao L., Zhang J., Guo Y., Li Z., Chen J., Xu W. Influence of Coupling Effects of Time and Water-to-Cement Ratio on Rheological Properties of Bingham Cement Grouts // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. 5781753. DOI 10.1155/2021/5781753.

15. Zhang L., Zuo W., Qian T., Xu W., Jiang Z., She W. Viscosity transition from dilute to concentrated cementitious suspensions: the effect of colloidal interactions and flocs percolation // Materials and Structures. 2022. Vol. 55. 244. DOI 10.1617/s11527-022-02075-8.

16. Inqiad W. B., Javed M. F., Alsekait D. M., Khan N. M., Khan M., Aslam F., Abd Elminaam D. S. Soft-computing models for predicting plastic viscosity and interface yield stress of fresh concrete // Scientific Reports. 2025. Vol. 15 (1). 10740. DOI 10.1038/s41598-024-77490-8.

17. Gallo-Molina J. P., Lesage K., Nopens I. Numerical Validation of a Population Balance Model Describing Cement Paste Rheology // Materials. 2020. Vol. 13 (5). 1249. DOI 10.3390/ma13051249.

18. Thiedeitz M., Kränkel T., Gehlen C. Viscoelastoplastic classification of cementitious suspensions: transient and non-linear flow analysis in rotational and oscillatory shear flows // Rheologica Acta. 2022. Vol. 61. Pp. 549–570. DOI 10.1007/s00397-022-01358-9.

19. Ivanov Y. P., Roshavelov T. T. The effect of condensed silica fume on the rheological behaviour of cement pastes // Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of an International Conference; Liverpool, 1990; ed. by P. F. G. Banfill. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1990. Pp. 23–26.

20. Rosquoët F., Alexis A., Khelidj A., Phelipot A. Experimental study of cement grout // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33 (5). Pp. 713–722.

21. Lapasin R., Longo V., Rajgelj S. Thixotropic behaviour of cement pastes // Cement and Concrete Research. 1979. Vol. 9 (3). Pp. 309–318.

22. Rubio-Hernández F.-J. Rheological Behavior of Fresh Cement Pastes // Fluids. 2018. Vol. 3 (4). 106. DOI 10.3390/fluids3040106.

23. Jones T. E. R., Taylor S. A mathematical model relating the flow curve of a cement paste to its water/cement ratio // Magazine of Concrete Research. 1977. Vol. 29 (101). Pp. 207–212. DOI 10.1680/mac.1977.29.101.207.

24. Yuan Y., Wang X., Chen X., Xiao P., Koenders E., Dai Y. Mathematical models of apparent viscosity as a function of water–cement/binder ratio and superplasticizer in cement pastes // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. 22301. DOI 10.1038/s41598-023-48748-4.

References

1. Stryczek S., Kremieniewski M. Multi-Component Cements for Sealing Casing Columns in Boreholes. *Buildings*, 2023, vol. 13 (7), 1633. DOI 10.3390/buildings13071633.

2. Sharma A., Gupta S., Husain M. N., Chaudhary S. Factors affecting the rheology of cement-based composites: A review. *Journal of the American Ceramic Society*, 2025, vol. 108 (6), e20429. DOI 10.1111/jace.20429.

3. Saffari M., Ameri M., Jahangiri A., Kianoush P. Development of rheological models depending on the time, temperature, and pressure of wellbore cement compositions: a case study of southern Iran's exploratory

oilfields. *Arabian Journal of Geosciences*, 2024, vol. 17, 175. DOI 10.1007/s12517-024-11982-9.

4. Emad W., Mohammed A., Kurda R. Comparison Between Two Nonlinear Models to Predict the Stress–Strain Behavior, Modulus of Elasticity, and Toughness of the Flowable Cement Paste. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022, vol. 46, pp. 2131–2145. DOI 10.1007/s40996-021-00700-0.

5. Thiedeitz M., Crasselt C., Xiao P., Ukrainczyk N., Schmidt W., Krönkel T. Multidisciplinary approach for the prediction of cement paste rheological properties: physical analysis, experimental rheology and microstructural modeling. *Proceedings of the 21st Ibausil International Conference on Building Materials*, 2023, vol. 6 (6), pp. 715–724. DOI 10.1002/cepa.2812.

6. Leite Skare E., Sheiati S., Cepuritis R., Mortsell E., Smeplass S., Spangenberg J., Jacobsen S. Rheology Modelling of Cement Paste with Manufactured Sand and Silica Fume: Comparing Suspension Models with Artificial Neural Network Predictions. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 317, 126114. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.126114.

7. Ukrainczyk N., Thiedeitz M., Krönkel T., Koenders E., Gehlen C. Modeling SAOS Yield Stress of Cement Suspensions: Microstructure-Based Computational Approach. *Materials*, 2020, vol. 13 (12), 2769. DOI 10.3390/ma13122769.

8. Pirharati M. E., Lowke D., Mai I. Modelling the effect of mortar constituents on rheological properties. *Proceedings of the 21st Ibausil International Conference on Building Materials*, 2023, vol. 6 (6), pp. 638–647. DOI 10.1002/cepa.2919.

9. Tao C., Kutchko B. G., Rosenbaum E., Massoudi M. A Review of Rheological Modeling of Cement Slurry in Oil Well Applications. *Energies*, 2020, vol. 13 (3), 570. DOI 10.3390/en13030570.

10. Mohammed A., Rafiq S., Mahmood W., Al-Darkazalir H., Noaman R., Qadir W., Ghafor K. Artificial Neural Network and NLR techniques to predict the rheological properties and compression strength of cement past modified with nanoclay. *Ain Shams Engineering Journal*, 2021, vol. 12 (2), pp. 1313–1328. DOI 10.1016/j.asej.2020.07.033.

11. Xu Z., Miao Y., Wu H., Yuan X., Liu C. Estimation of Viscosity and Yield Stress of Cement Grouts at True Ground Temperatures Based on the Flow Spread Test. *Materials*, 2020, vol. 13 (13), 2939. DOI 10.3390/ma13132939.

12. Xu Z., Sun J., Li R., He L., Liu C. Effects of elevated ground temperatures on properties of cement grouts for deep rock grouting. *Deep Underground Science and Engineering*, 2025, vol. 4(2). Pp. 171–188. DOI 10.1002/dug2.12073.

13. Li M., Han J., Zhou Y., Yan P.A Rheological Model for Evaluating the Behavior of Shear Thickening of Highly Flowable Mortar // *Molecules*. 2021. Vol. 26 (4). 1011. DOI 10.3390/molecules26041011.

14. Yang Z., Chen M., Ding Y., Yang Y., Zhu Y., Guo Y., Wang R., Zhang B., Fang Y., Yu D., Mi Y., Su J., Hao L., Zhang J., Guo Y., Li Z., Chen J., Xu W. Influence of Coupling Effects of Time and Water-to-Cement Ratio on Rheological Properties of Bingham Cement Grouts // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. 5781753. DOI 10.1155/2021/5781753.

15. Zhang L., Zuo W., Qian T., Xu W., Jiang Z., She W. Viscosity transition from dilute to concentrated cementitious suspensions: the effect of colloidal interactions and flocs percolation. *Materials and Structures*, 2022, vol. 55, 244. DOI 10.1617/s11527-022-02075-8.

16. Inqiad W. B., Javed M. F., Asekait D. M., Khan N. M., Khan M., Aslam F., Abd Elminaam D. S. Soft-computing models for predicting plastic viscosity and interface yield stress of fresh concrete. *Scientific Reports*, 2025, vol. 15 (1). 10740. DOI 10.1038/s41598-024-77490-8.

17. Gallo-Molina J. P., Lesage K., Nopens I. Numerical Validation of a Population Balance Model Describing Cement Paste Rheology. *Materials*, 2020, vol. 13 (5), 1249. DOI 10.3390/ma13051249.

18. Thiedeitz M., Krönkel T., Gehlen C. Viscoelastoplastic classification of cementitious suspensions: transient and non-linear flow analysis in rotational and oscillatory shear flows. *Rheologica Acta*, 2022, vol. 61, pp. 549–570. DOI 10.1007/s00397-022-01358-9.

19. Ivanov Y. P., Roshavelov T. T. The effect of condensed silica fume on the rheological behaviour of cement pastes. *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of an International Conference; Liverpool, 1990*; ed. by P. F. G. Banfill. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1990, pp. 23–26.

20. Rosquont F., Alexis A., Khelidj A., Phelipot A. Experimental study of cement grout. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33 (5). Pp. 713–722.

21. Lapasin R., Longo V., Rajgelj S. Thixotropic behaviour of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1979, vol. 9 (3), pp. 309–318.

22. Rubio-Hernández F.-J. Rheological Behavior of Fresh Cement Pastes // *Fluids*. 2018. Vol. 3 (4). 106. DOI 10.3390/fluids3040106.

23. Jones T. E. R., Taylor S.A mathematical model relating the flow curve of a cement paste to its water/cement ratio. *Magazine of Concrete Research*, 1977, vol. 29 (101), pp. 207–212. DOI 10.1680/macrc.1977.29.101.207.

24. Yuan Y., Wang X., Chen X., Xiao P., Koenders E., Dai Y. Mathematical models of apparent viscosity as a function of water–cement/binder ratio and superplasticizer in cement pastes. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, 22301. DOI 10.1038/s41598-023-48748-4.